

平板の背後に形成される後流域の発達過程

——アルミ粉懸濁法による可視化——

瀬戸 雅文* ・糸 洸 長 敬** ・邵 仙 玉***
巻 口 範 人**** ・中 村 充*****

1. はじめに

平板、円柱など流体力学的に鈍い物体を定常流内に設置すると、その背後に形成される後流域には、一般にレイノルズ数 (R_e) が数十程度で対称的な双子渦が形成され、数百～千程度で流れは対称性を失い非定常となり、2次元物体においては背後にカルマン渦列を形成することが知られている。一方、非定常流場においては、後流域の形状は R_e 数によらず新たな無次元数 F_L に依存して変化し、 R_e 数が数万程度においても依然として対称的な後流形状を保つ場合が存在すること。さらに、後流(逆流)域の発達が物体に作用する質量力の発生機構とも関連して極めて重要な現象であることが、瀬戸ら (1991) による等加速度場、および等曳行速度場における流体力および平板後流域周辺の流速分布測定結果より明らかになっている。本現象は、日常的な経験の中でも度々見つけられる。例えば、川遊びなどで川の中を歩いて横断した経験は誰もが一度はもっているものであるが、その際、流水中で足を一歩進めると、新たな足場を踏みしめた瞬間に一番大きな流水抵抗を感じ、それより少し遅れて足場が安定(流水抵抗も減少)したような感じを受ける。これは、流れに対して流体力学的に鈍い形状の物体(ここでは足)が新たに配置された瞬間、その背後に後流域が急速に発達することに起因する力が物体に作用したものと考えれば理解できる。瀬戸ら (1991) は、この質量力を後流逆流域の容積を用いて基準化することによって、主流の速度、加速度にもよらない、物体の形状のみに依存する普遍常数(後流質量力係数)の形で統一的に評価できることを示した。しかし、このような後流域の発達過程はカルマン渦に代表される定常流場における流況とかなり異なっており、常識的に定常流の類推からでは受け入れ難い結果となっている。そこで、本研究では、このような非定常流場における後流(逆流)域の発達過

程を、流れを可視化することによって直接視覚的にとらえると共に、本現象を統一的に支配する無次元数 F_L の有効性を確認することを目的とした。

2. 無次元数 F_L の誘導

物体周辺の流れ場の模式図を図-1に示す。

水平および鉛直方向を x, y 、静止座標系に対して物体による摂動を受けない水平方向の主流流速を u 、流れ場の密度を ρ とする。瀬戸ら (1991) は、流れ場内を付着後流(容積 v')を伴った物体(体積 v)が速度 U で水平に移動している場合の、付着後流を伴った物体 ($v + v'$) に関する運動方程式を運動量則の立場から展開することによって、後流質量力係数と、 v' (新たな無次元数 F_L の関数) および物体、流れの条件から質量力が評価されることを示した。本論文では、これに引き続き、物体を伴った流れ場に関する運動方程式について考える。

流れ場内に物体が存在すると、これによって流体は体積力 (F) を受けるが、これを $\rho\alpha$ 、 α は流れ場系と物体の相対加速度で

$$\alpha = \frac{\partial |u - U|}{\partial t} \dots \dots \dots (1)$$

とすると、物体背後の自由乱流場の運動方程式は主流 x 方向について

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad})u &= \frac{1}{\rho} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \epsilon \nabla^2 u \\ &= \alpha - g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \epsilon \nabla^2 u \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 $\vec{v}$ は流速 (u, v, w)、 ϵ は渦動粘性係数、 p は

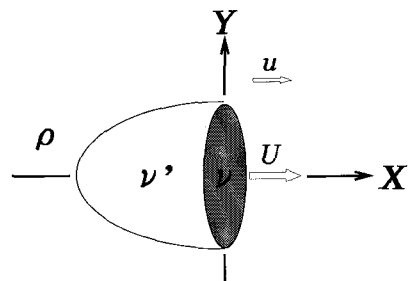


図-1 物体と流れ場のモデル化

* 正会員 水産博 北海道立中央水産試験場 企画情報室
** 正会員 農 博 東京水産大学助教授 水産学部海洋生産学科
*** 東京水産大学大学院 海洋生産学科
**** 三井造船(株) 船舶海洋事業部
***** 正会員 農 博 福井県立大学教授 生物資源学部海洋生物資源学科

圧力, ξ は水位, g は重力加速度である. この現象における各物理量のスケールについて, 長さ, 流速, 時間をそれぞれ $l, V, l/V$ 程度の現象とすると

$$x, y, z = l(x_0, y_0, z_0), t = t_0 l/V$$

$$u, v, w = V(u_0, v_0, w_0)$$

であるから (1) 式は,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_0}{\partial t_0} + (\vec{v}_0 \cdot \text{grad}_0) u_0 \\ &= \frac{lg}{V^2} - \frac{lg}{V^2} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\varepsilon}{lV} \nabla_0^2 u_0 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに右辺の各項はそれぞれ, 流体力と慣性力, 重力と慣性力, 渦粘性力と慣性力の比で第2, 3項より定義される無次元数は従来よりフルード数 ($F_r = V/(gl)^{1/2}$), 乱流レイノルズ数 ($Re = lV/\nu$) として知られている. 自由乱流場では粘性作用に比べてレイノルズ応力による拡散作用が支配的となるため, 流れの構造はレイノルズ数には無関係で流れの型にのみ依存し, Re は物体の形状のみに依存する形で各物体形状で固有の定数値をとることが知られている(谷ら, 1980). 従って非定常流場における流体力およびこれに関連する後流域の流動特性の多くは, (2) 式右辺第1項で定義される無次元数 F_t

$$F_t = \frac{u}{(\alpha l)^{1/2}} \dots\dots\dots (4)$$

に依存していることが示唆される.

3. 実験方法

実験概要図を図-2に示す.

可視化実験には東京水産大学所有の小型回流水槽(PT-120 西日本流体技研製)を使用した. 本水槽は水深20 cm, 水路幅30 cmでアクリル製の測定部(流路長さ120 cm)を有し, インバータと接続することにより流速値0~200 cm/sの範囲で任意の定常流および等加速度流場を作ることができる. 供試物体は縦・横共に3 cm, 4 cmで, 何れも厚さ1.2 mmの2種類の真鍮製(3次元)平板で, これを板の面が主流と垂直になるように四隅をステ

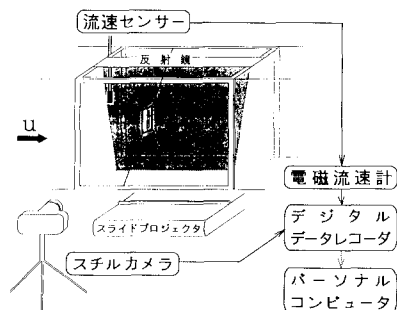


図-2 実験概要図

ンレス製ワイヤを用いて高さ20 cm, 奥行き30 cm, 幅30 cmのアングル台に張り付けた上で, 平板が水路中心部に配置されるように水槽内にアングル台を固定した. この際, アングル台および平板による水路の遮蔽率は2.7%以下であり主流と物体の相互干渉は無視できるものと考えた. 三次元物体周辺の流況を定量化も含めて可視化するためには, 基本的には流れのトレーサも三次元的に配置されている必要がある. このため本実験ではアルミ粉懸濁法を用い, 事前にアルミ粉の輝き方と使用光源との相性を調べた上で最適と認められたアルミ粉濃度40 mg/lでアルミ粉を水槽内に分散させた.

ここに, 図-3に示すように加速度0.30 cm/s²~16.32 cm/s²までの範囲で7パターンの等加速度流場を作り実験に供した. 実験では主流の流速を, 各加速度パターンごとに無次元数 F_t が0~14まで変化するように最大流速値を設定した. これに対応する主流流速(u)は0~113 cm/sの範囲であり, これは Re 数で0~30300の範囲となる.

アクリル製の水路測定部の底面より, 主流方向に光が平板の中心線を通るように幅3 mmのスリット光をスライドプロジェクタ(光源ハロゲンランプ500 W)より照射し, 水路上部に設置した反射鏡で再反射させ重合させることによってスリット内のアルミ粉に上下より均等に光を当てて, 鱗片状の表面をもつアルミ粉の反射方向による輝き方の違いを極力抑えた上で, スチルカメラで撮影した. その結果アルミ粉の描く軌跡の長さから, 大体の流速分布を定量化することも可能である.

撮影写真番号に対応する主流の流速値は, 図-4に示すようにカメラのシャッター信号(シャッターが切れた瞬間およびフィルムの巻き上げ終了時の2回出力されるパルス)を電圧値として出力し, 電磁流速計より計測される主流流速値と同一時系列上でデジタルデータレコーダに記録することにより解析した.

また, 板幅4 cmの平板の中心線に沿って等加速度0.58 cm/s², 1.12 cm/s², 2.13 cm/s²の3パターンにおいて板幅の3倍後方まで8 mm間隔計15測点における流速変動を電磁流速計で計測した. さらに水路幅1.45 m,

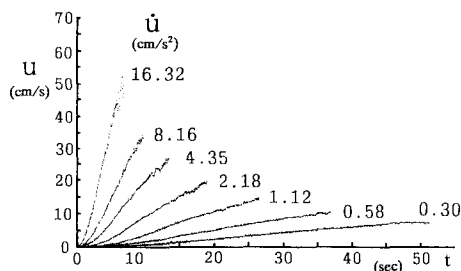


図-3 等加速度流場

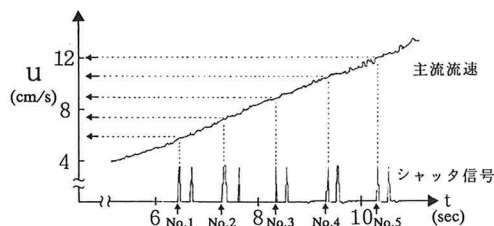


図-4 シャッタ信号と主流流速

また、板幅 20 cm の平板を用いて、等加速度 0.6 cm/s^2 で主流が加速する場合の平板周辺の流速分布を、写真-1 の Ft 値に対応する場合について示すと図-5 となる。

これらより、主流流速の上昇とともに次第に平板背後に対称形状の後流域が発生し、次第に発達してゆく様子

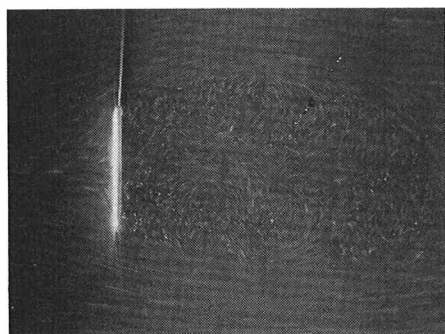
水深 1.2 m の大型回流水槽を用いて、ここに加速度 0.6 cm/s^2 の等加速度場を作った上で、板幅 20 cm の平板周辺(流れ方向に板幅の 3.2 倍後方、これと垂直方向に板幅の 2.0 倍横方向の範囲内計 54 測点)の平面変動流速分布も計測し可視化実験結果との比較に用いた。計測データは何れも 50 Hz で A/D 変換後パーソナルコンピュータで処理した。

4. 実験結果

まず、主流の流速 5.0 cm/s の定常流場における平板周辺の断面流況を写真-1 に示す。

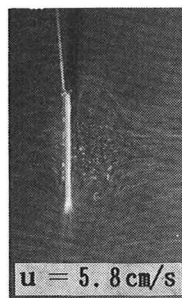
ここに示すように、定常流場では、 Re 数が数千程度において既に大規模な後流域が形成される。本部材は 3 次元平板のため 2 次元平板におけるように背後にカルマン渦列は発生しないが、後流内部は渦運動など時空間的に極めて複雑な流況を呈している。なお、このような流況も時間平均的に扱えば流速分布は対称的となり、主流部分と一つの不連続面で隔てられた付着後流域を仮定することができて、写真-1 におけるレイノルズ数 2000 程度においては、板幅の 2.2 倍程度の流れ方向の長さをもつ後流逆流域を有している(瀬戸ら, 1991)。

等加速度場における平板後流域の発達過程の一例を写真-2 に示す。これらは板幅 4 cm の平板周辺で主流流速が等加速度 16.3 cm/s^2 で上昇する場合の流況を捉えたものである。

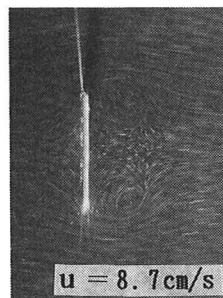


$u = 5.0 \text{ cm/s}$, $Re = 1540$

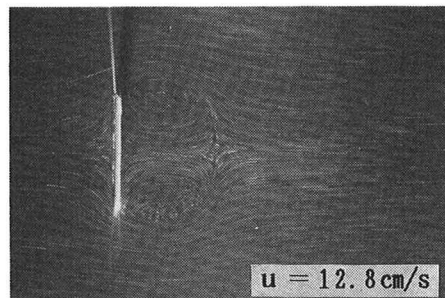
写真-1 定常流場の流況



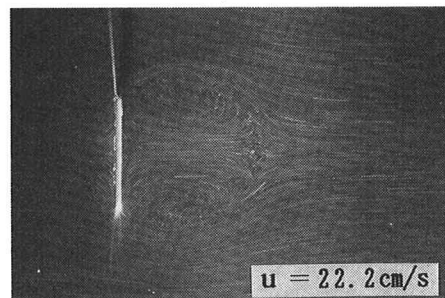
$Ft = 0.7$
 $Re = 1950$



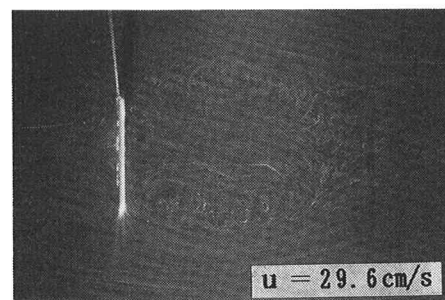
$Ft = 1.1$
 $Re = 2900$



$Ft = 1.6$, $Re = 4300$



$Ft = 2.8$, $Re = 7400$



$Ft = 3.7$, $Re = 9900$

写真-2 等加速度流場の流況 (板幅 4 cm)

がわかる。またその発達過程は F_t で整理すれば板幅によらずほぼ統一的に評価され、 Re 数が数千～1万程度においても依然として対称的な後流流速分布を呈している。

図-5 内の点線で囲った流域内がほぼ後流逆流域であるが、これに相当する部分は写真-2を図-6のように模

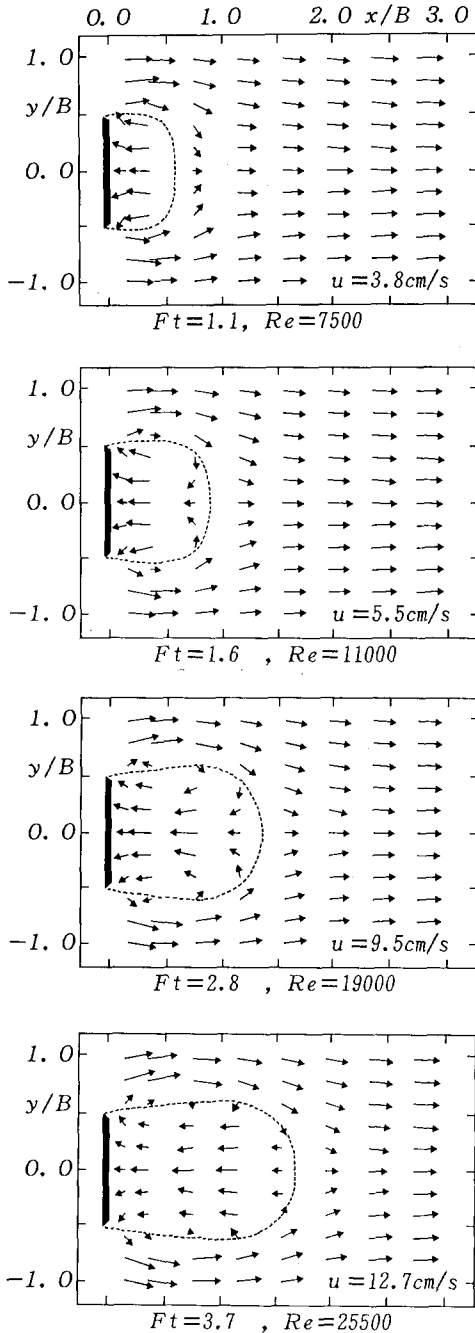


図-5 等加速度流場の流況 (板幅 20 cm)

式的に解釈することによって可視化写真結果からも判断することができて、逆流域の長さ L を計測することが可能となる。

可視化写真結果より後流逆流域の長さ L を計測し、板幅 B で基準化して Re 数で整理して示すと図-7となる。

これより、後流逆流域は何れの等加速度においても Re 数の1乗に比例して発達し、瀬戸ら (1991) の報告におけるように板幅の約2.7倍付近において後流逆流域の発達が終了し、その形状は不規則非対称的となり可視化による L 値の判断が不能となる。さらに、逆流長 L は各幅ごとに、低加速度ほど Re 数が小さい時期より成長を開

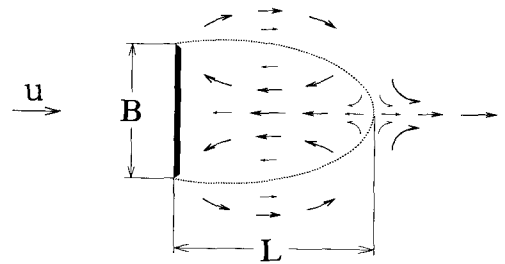


図-6 後流逆流域の判定

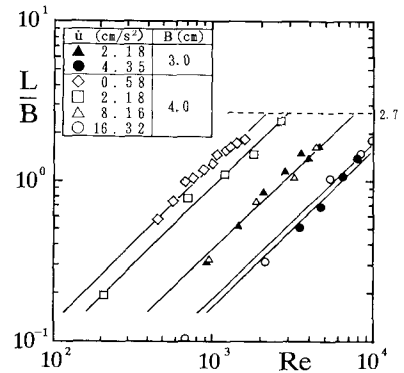


図-7 後流逆流長の Re 数による変化

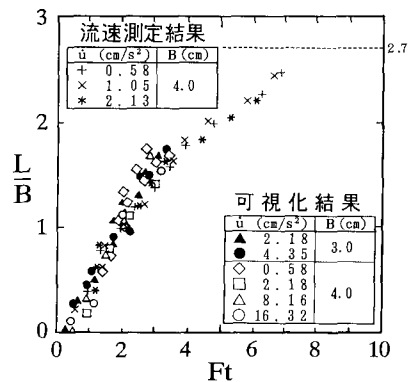


図-8 後流逆流長の F_t による変化

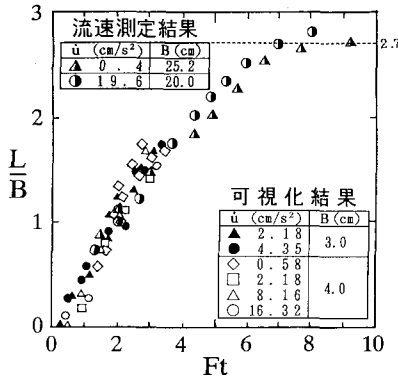


図-9 後流逆流長の F_t による変化

始していることもわかる。しかし、これらの発達過程は R_e 数で整理すると主流の加速度値および板幅により異なった直線上で評価され統一的に表現できていない。

これを無次元数 F_t で整理すると図-8となる。

ここには、電磁流速計による板幅 4 cm の平板後流域の中心線上に沿った流速測定結果より得られた後流逆流長 L も示した。これより、 F_t で整理された可視化結果は加速度、板幅によらずほぼ同一曲線上にプロットされ、また流速測定結果とほぼ一致しその妥当性が再確認された。

さらに、瀬戸ら (1991) により行われた縦・横の板幅が共に 25.2 cm の平板が等加速度 0.40 cm/s² で加速される場合および縦横共に 20.0 cm の平板が等加速度 19.6 cm/s² で加速される場合の後流逆流長の発達過程を可視化結果と共に F_t で整理して示すと図-9となる。

これらすべては無次元数 F_t を用いることにより同一

曲線上で統一的に表現される。

5. おわりに

本研究では後流逆流域の発達過程を可視化により視覚的に捉えることによって本現象の存在を確認できた。加速度場における後流域の形状および変動特性は定常流場のそれとは本質的に異なっており、これを記述するために新たに導かれた無次元数 F_t は加速度値、および物体の代表長さが一桁以上異なる場合においても後流逆流域の特性を統一的に表現することが可能であり有効である。本現象は物体に作用する質量力が F_t で整理できることと関連して、その発生機構を検証するための基礎的知見として重要である。今後、さらに等減速度場について、物体に作用する質量力に及ぼす後流域の役割を水理実験の手法により解明するとともに、付着後流モデルを適用し、定量評価した上で、将来的には波浪場に拡張してゆく必要がある。他方、従来より、主として後流域における研究のテーマとされてきた問題、すなわち物体周辺に形成される剥離渦の発生機構、およびその掃き出し周波数レベルで変動する後流渦の発達、維持、消滅機構に関する知見の蓄積によって、例えば、本研究において何故平板背後の後流逆流長さが板幅の 2.7 倍程度に収束するのかといった自由せん断乱流の本質的で厄介な問題について解明されてゆくものと考えられる。

参考文献

- 瀬戸雅文・糸刈長敬・中村 充・田北博司 (1991): 平板の背後に形成される後流域より発生する質量力, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 666-670.
- 谷 一郎 (1980): 流体力学の進歩乱流, 丸善, pp. 85-128.